靶向性调控胫骨前肌对静态平衡的影响——基于经颅直流电刺激的干预

梁志强[1],江勇[2],教富佳[1],朱春月[1],付田莉[1],周俊鸿[3],吕娇娇[1],刘宇[1]

(1. 上海体育学院运动健身科技省部共建教育部重点实验室,200438 上海;
2. 哥廷根大学医学中心,37075 哥廷根 德国;3. 哈佛大学哈佛医学院,02138 波士顿 美国)

摘　要:目的　采用随机、双盲交叉实验设计,探究经颅直流电刺激(transcranial direct current stimulation,tDCS)对胫骨前肌的靶向性调控是否可以诱导静态平衡表现的改善。**方法**　使用经颅磁刺激(transcranial magnetic stimulation,TMS)确定胫骨前的肌皮层热点靶区,24 名在校大学生以随机的顺序接受两次刺激——20 min,2 mA tDCS 和假刺激(sham),每次刺激前后分别完成 TMS 测试和平衡能力测试,评估 tDCS 靶向性调控胫骨前肌对皮层兴奋性以及双足睁眼、双足闭眼、单足睁眼和单足闭眼静态平衡的影响。**结果**　(1)tDCS 和 Sham 未呈现明显的组间差异;相比基线,tDCS 刺激显著增大双足睁眼的平均速度,显著降低单足闭眼的动摇总轨迹长。(2)相比 Sham,tDCS 显著增大双足睁眼和单足闭眼 Y 方向平均中心变位。相比基线,tDCS 显著降低双足睁眼 Y 方向平均中心变位、单足闭眼 Y 方向平均速度。(3)相比 Sham,tDCS 显著增加双足睁眼 X 方向平均中心变位、单足闭眼 X 方向平均中心变位和双足睁眼 X 方向最大动摇经。相比基线,tDCS 显著增加双足睁眼 X 方向平均中心变位、单足睁眼 X 方向平均中心变位、单足闭眼 X 方向平均中心变位和双足闭眼 X 方向平均速度。(4)tDCS 和 Sham 的运动诱发电位与静息运动阈值(resting motor threshold,RMT)未呈现明显的组间差异。相比基线,tDCS 显著降低 RMT。**结论**　tDCS 靶向性调控胫骨前肌可有效改善单足闭眼平衡表现,但刺激方案对左右方向控制肌群的忽视降低了双足睁眼站立平衡表现;tDCS 对胫骨前肌的靶向调控是一种改善前后方向平衡表现的有效手段。

关键词:经颅直流电刺激;经颅磁刺激;胫骨前肌;静态平衡;神经生理学
中图分类号:G80-05　　**文献标志码:**A

Effect of targeted modulation of the anterior tibialis muscle via transcranial direct current stimulation on static balance

LIANG Zhiqiang[1],JIANG Yong[2],JIAO Fujia[1],ZHU Chunyue[1],FU Tianli[1],ZHOU Junhong[3],LÜ Jiaojiao[1],LIU Yu[1]

(1. Key Laboratory of Exercise and Health Sciences of Ministry of Education,Shanghai University of Sport,
200438 Shanghai,China;2. Medical Center,University of Göttingen,37075 Göttingen,Germany;
3. Harvard Medical School,Harvard University,02138 Boston,MA,United States)

Abstract: The aim of this study was to explore the effect of targeted modulation of the tibialis anterior mus-

chinaXiv:202303.00346v1

收稿日期:2022-03-18　　**修回日期:**2022-05-19
基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(No. 11932013);教育部人文社会科学研究一般项目(No. 19YJCZH115)
通信作者:吕娇娇,副教授。E-mail:ljj27@163. com
引用格式:梁志强,江勇,教富佳,等. 靶向性调控胫骨前肌对静态平衡的影响——基于经颅直流电刺激的干预[J]. 应用力学学报,2023,40(1):225-233.
LIANG Zhiqiang,JIANG Yong,JIAO Fujia, et al, Effect of targeted modulation of the anterior tibialis muscle via transcranial direct current stimulation on static balance[J]. Chinese journal of applied mechanics,2023,40(1):225-233.

ChinaXiv合作期刊

cle by transcranial direct current stimulation (tDCS) on static balance performance. Totally 24 college students received 20 min of tDCS and sham on tibialis anterior muscle at 2 mA in a randomized order. Transcranial magnetic stimulation (TMS) and balance tests were completed to assess the neurophysiological and balance performance before and after each stimulation. Results show that tDCS significantly increased the mean displacements in the *Y*-direction (MDY) on both double with eyes-opening and single with eyes-closing. Compared to the baseline, tDCS significantly reduced MDY on double with eyes-opening and the mean velocity in the *Y*-direction on single with eyes-closing. tDCS significantly increased the mean displacements *X*-direction (MDX) on double with eyes-opening and single with eyes-closing and the maximum sway diameter in the *X*-direction on doublet with eyes-opening. Compared to the baseline, tDCS significantly increased MDX on double with eyes-opening, single with eyes-opening, and double with eyes-closing; furthermore, the mean velocity in the *X*-direction on double with eyes-closing was increased. Compared with baseline, tDCS significantly reduced resting motor threshold. Targeted stimulation on the tibialis anterior muscle by tDCS is effective in improving the single balance with eyes-closing.

Key words: transcranial direct current stimulation; transcranial magnetic stimulation; tibialis anterior muscle; static balance; neurophysiology

chinaXiv:202303.00346v1

作为非侵入性的神经调控技术,经颅直流电刺激(transcranial direct current stimulation, tDCS)通过向大脑皮层施加微弱电流的方式实现对大脑中枢功能和平衡能力的调控[1-2]。tDCS 对大脑初级运动皮层(primary motor cortex, M1)、背外侧前额叶皮层和小脑皮层的调控有效改善了健康青年人、老年人和患者(中风)动静态平衡能力[1-3]。但尽管 tDCS 在平衡能力调控方面呈现有效的发展趋势,其对平衡的调控方案仍处于一个起步发展阶段。现阶段,tDCS 对平衡刺激靶区的定位主要依据 10-20 国际脑电系统(10-20 international EEG system)[4],但统一的 tDCS 刺激靶点定位标准无法克服个体生物特征(如皮肤、颅骨、脑脊液和大脑组织等)的差异对调控效果的影响。此外,平衡涉及的下肢环节仅大腿的皮层控制区域位于皮层上方,其余环节的皮层控制区位于较深的两半球内侧[5];下肢各环节皮层解剖位置的特殊性增加了 tDCS 对下肢肌群皮层控制区电场的泛化程度(到达下肢脑区的电流“剂量”可能比上肢少),减弱了下肢 tDCS 方案的靶向性。因此,仅依据 10-20 国际脑电系统进行定位, tDCS 对下肢平衡的有效调控方案可能不是最优的电极放置方式[4]。

经颅磁刺激(transcranial magnetic stimulation, TMS)技术可通过磁场脉冲的方式克服人体解剖结构特征的局限,对人体不同部位大脑皮层控制区进行的定位[6]。尽管前人研究中,TMS 的刺激靶区多为上肢肌肉(如第一骨间背侧肌)[7],但近期研究发现 TMS 的 8 字形线圈同样可以成功实现对下肢胫骨前肌的精确定位[6]。人体胫骨前肌作为人体平衡控制中的远端肌群[8],胫骨前肌的激活会为大脑中枢提供准确的反馈信息,增强大脑中枢对人体平衡稳定的控制与调节[9-10]。因此,本研究将基于 TMS 技术的精确定位,探讨 tDCS 靶向性调控胫骨前肌对人体静态平衡和神经生理学表现的影响;本研究假设,该 tDCS 方案将显著提高大脑皮层下肢控制区的兴奋性;tDCS 对胫骨前肌的靶向性激活,将有效改善人体的静态平衡能力。

1 研究对象与方法

1.1 研究对象

24 名健康成年在校大学生参与本次测试,其中男性 13 人,年龄(20.61 ±1.89)岁,女性 11 人,年龄(21.70 ±3.16)岁。受试者招募标准为:①在校大学生,且年龄处于 18 ~35 岁;②右侧下肢为优势腿;③近半年内未发生任何下肢、上肢损伤;④无任何癫痫史等神经系统疾病;⑤大脑中未植入任何金属物质;⑥TMS 检测符合“胫骨前肌有肌电无反应”的判断标准。

1.2 实验流程

研究采用随机、双盲、交叉实验设计测试 tDCS 靶向性调控胫骨前肌方案对静态平衡的调控效果。

整个实验流程,受试者需来访实验室3次;第1次,利用TMS对胫骨前肌的刺激靶点进行定位;第2次和第3次,受试者随机接受tDCS刺激和sham刺激,并在刺激前后分别完成神经生理学测试与平衡能力测试;为避免不同刺激方式对平衡能力的影响,受试者每次来访实验室时间至少间隔72 h。

第2次和第3次测试,除刺激类型的差异外,受试者需要分别完成2次相同测试流程的TMS神经生理学测试和平衡能力测试。具体为,每次正式实验,受试者按照先后顺序完成基线水平的大脑皮层兴奋性和皮质脊髓通路兴奋检测与双足睁眼、双足闭眼、单足睁眼和单足闭眼静态平衡能力测试;测试结束即刻,受试者随机接受20 min,2 mA的tDCS或假刺激(sham);待刺激完成即刻,再次按照基线测试流程进行TMS神经生理学测试和平衡能力测试。整个实验过程中,TMS神经生理学测试、平衡能力测试以及tDCS/Sham刺激干预分别由不同实验人员负责,各主试者测试期间不允许进行任何有关实验测试的交流。

1.3 神经生理学表现测试

所有受试者采用静坐的体位完成TMS(Magstim200,Dyfed,英国)神经生理学检测。测试前,将记录电极放置右腿胫骨前肌肌腹处,参考电极放置肌腱部位(近腓骨小头处),地线放置髌骨上方连接处。根据10-20国际脑电系统(10-20 international EEG system),采用8字形线圈(直径为9 cm)在Cz附近寻找到受试者右侧胫骨前肌的热点位置,并用记号笔对靶点进行标记。采用运动诱发电位(motor evoked potential,MEP)与静息运动阈值(resting motor threshold,RMT)对刺激前后的皮质脊髓通路兴奋性和大脑皮层兴奋性进行记录。

1.4 静态平衡能力测试

受试者在Super balance平衡仪(50 Hz,奥美,中国)上完成双足睁眼、双足闭眼、单足睁眼和单足闭眼4种平衡能力测试。其中,单足睁眼和单足闭眼测试模式选用"优势腿"进行。平衡测试过程中要求受试者保持平衡,每种测试时间和组间休息时间均为30 s;若某种模式的测试过程中出现脚尖或其他部位触及测试界面外或身体失衡等现象均视为失败,需在休息1 min后重新进行该项测试。前人的研究表明,平衡测试的,身体动摇轨迹长、平均摆动速度、平均中心变位和最大动摇径是反应身体重心摆动幅度、身体稳定性、身体重心摆动与足底压力中心距离和身体重心最大与最小摆动距离的敏感指标[11]。因此,本研究采用动摇总轨迹长(displacement trajectory,DT)和平均速度(velocity,V)对整体平衡表现进行评估,采用Y方向平均中心变位(mean displacement in Y direction,MDY)、Y方向最大动摇径(maximal displacement trajectory in Y direction,MDTY)和Y方向平均速度(velocity in Y direction,VY)对前后平衡表现进行评估,采用X方向平均中心变位(mean displacement in X direction,MDX)、X方向最大动摇径(maximal displacement trajectory in X direction,MDTX)和X方向平均速度(velocity in X direction,VX)指标对左右平衡表现进行评估。

1.5 经颅直流电刺激

tDCS和sham刺激由DC-Stimulator(50 Hz,Neuroconn,德国)电刺激设备完成。tDCS和sham刺激选用对侧电极摆放位置方案[12],阳极刺激电极放置胫骨前肌热点处,阴极刺激电极放置对侧右眉骨正上方(Fp3);刺激电极大小为3 cm×5 cm。tDCS和sham刺激强度为2 mA,刺激时间为20 min,但sham刺激在开始刺激30 s后,刺激电流强度将降为0。tDCS和sham刺激电流采用30 s淡入和30 s淡出的控制方式。为保持好的刺激效果,降低tDCS刺激调控副作用,所有刺激电极在使用前使用9%的生理盐水进行浸润。

1.6 统计分析

所有采集到的神经生理学指标和平衡能力指标均采用Shapiro-wilk进行正态性检验。当数据符合正态分布,采用平均值±标准差(M±SD)对指标数据进行表达;采用配对样本t检验对刺激前后和不同刺激条件间的平衡指标及神经生理学指标进行统计分析。若数据不符合正态分布,采用四分位数(P25,P75)对指标数据进行表达;采用Wilconxon铁和检验对刺激前后和不同刺激条件间的平衡指标及神经生理学指标进行统计分析。所有统计分析均在SPSS 26.0(IBM,美国)统计分析软件中进行,$P<0.05$为差异具有统计学意义。

chinaXiv:202303.00346v1

ChinaXiv合作期刊

2 研究结果

2.1 经颅直流电刺激对整体平衡控制的影响

组间分析发现(表 1),tDCS 和 sham 刺激未在双足睁眼、双足闭眼、单足睁眼和单足闭眼平衡表现中呈现不同。相比基线,tDCS 刺激显著增大双足睁眼的 $V(z = -2.03, P = 0.042)$,显著降低单足闭眼的 DT$(z = -2.16, P = 0.031)$,但未对双足闭眼和单足睁眼的平衡表现产生明显影响。相比基线,sham 刺激未引起双足睁眼、双足闭眼、单足睁眼和单足闭眼平衡表现的不同。

表 1 经颅直流电刺激靶向性调控胫骨前肌对整体平衡控制表现的影响

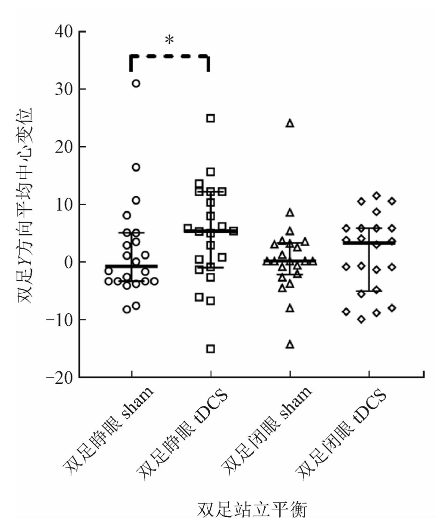
Tab. 1 Effect of transcranial direct current stimulation on balance performance

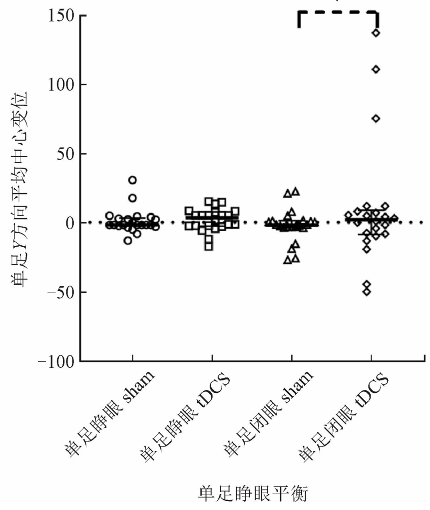
指标		sham		tDCS		组间分析 P
		Pre	Post	Pre	Post	
双足睁眼	DT	193.02(170.68,247.12)	178.69(168.69,207.72)	176.18(165.11,247.44)	182.64(171.59,250.07)	0.291
	V	5.68(3.38,8.29)	8.17(5.90,12.06)	5.78(3.32,12.53)#	6.23(2.88,11.30)#	0.242
双足闭眼	DT	182.84(164.19,251.75)	174.59(166.10,271.70)	180.31(165.163,255.16)	181.52(173.71,273.23)	0.322
	V	8.15(7.50,12.85)	7.80(7.40.14.38)	9.16(4.45,14.23)	7.75(4.48,12.58)	0.289
单足睁眼	DT	459.39(388.36,663.20)	374.24(313.91,557.19)	419.40(316.01,639.99)	417.49(308.58,571.77)	0.808
	V	4.06(2.34,5.66)	4.24(2.57,6.00)	3.37(1.87,4.84)	3.89(2.00,5.33)	0.592
单足闭眼	DT	1 084.13(726.80,1 496.61)	841.27(726.89,1 170.11)	1 088.41(554.78,1 419.59)#	842.42(681.68,1 124.10)#	0.935
	V	2.42(1.18,3.34)	2.71(1.45,3.61)	1.76(1.12,3.03)	2.23(1.14,3.64)	0.910

注:Pre 代表基线,Post 代表刺激后; # 代表 sham 和 tDCS 刺激前后存在显著差异。

2.2 经颅直流电刺激对前后方向平衡控制的影响

组间分析发现(图 1 和表 2),tDCS 刺激和 sham 刺激在双足睁眼和单足闭眼 MDY 存在显著差异;相比 sham 刺激,tDCS 刺激显著增大双足睁眼($z = -2.03, P = 0.042$)和单足闭眼 MDY($z = -2.13, P = 0.033$)。tDCS 和 sham 刺激未对双足睁眼、双足闭眼、单足睁眼和单足闭眼前后方向的平衡表现产生显著的影响。相比基线,tDCS 刺激显著降低双足睁眼 MDY($z = -2.45, P = 0.013$)、单足闭眼 VY($z = -2.30, P = 0.020$),但未引起双足闭眼、单足睁眼前后方向的平衡表现的产生不同。相比基线,sham 刺激未对双足睁眼、双足闭眼、单足睁眼和单足闭眼前后方向平衡表现产生影响。





(* 代表不同刺激的组间存在显著差异)

图 1 经颅直流电刺激靶向性调控胫骨前肌对 Y 方向平均中心变位指标的组间影响

Fig. 1 Between-group effects of targeted modulation of the tibialis anterior muscle by transcranial direct current stimulation on the mean central displacements in the Y direction

表 2 经颅直流电刺激靶向性调控胫骨前肌对前后方向平衡表现的影响

chinaXiv:202303.00346v1

Tab. 2 Effect of transcranial direct current stimulation on balance performance in the anterior-posterior direction

指标		tDCS		sham		组间分析
		Pre	Post	Pre	Post	P
双足睁眼	MDY	7.46(4.43,10.34)	5.33(4.07,9.09)	6.94(4.55,10.22)#	5.86(4.12,12.24)#	0.042*
	MDTY	6.45(5.68,8.25)	5.95(5.60,6.95)	5.90(5.50,8.23)	6.10(5.70,8.34)	0.709
	VY	8.80(7.30,11.90)	7.70(7.45,9.18)	7.70(7.10,12.08)	7.80(7.45,10.90)	0.244
双足闭眼	MDY	7.40(4.07,8.89)	7.12(4.22,12.44)	5.79(3.89,9.58)	5.24(4.17,11.90)	0.592
	MDTY	6.10(5.50,8.40)	5.80(5.58,9.05)	6.05(5.78,9.13)	6.00(5.50,8.50)	0.592
	VY	8.15(7.50,12.85)	7.80(7.40,14.38)	8.10(7.68,13.13)	7.85(7.48,12.73)	0.108
单足睁眼	MDY	13.61(9.87,22.88)	11.08(9.07,21.92)	14.23(9.78,21.19)	13.22(10.97,21.46)	0.062
	MDTY	15.30(12.93,22.15)	12.45(10.45,18.56)	13.95(10.53,21.30)	13.90(10.28,19.09)	0.338
	VY	20.75(17.95,30.23)	17.40(14.03,24.56)	18.25(15.60,29.73)	18.50(13.88,27.05)	0.299
单足闭眼	MDY	26.27(17.82,45.72)	25.66(18.65,35.24)	27.70(19.45,40.94)	28.33(17.20,44.94)	0.033*
	MDTY	36.15(24.25,49.85)	28.00(24.25,39.00)	36.30(18.48,47.33)	28.10(22.73,46.15)	0.485
	VY	46.10(31.93,70.15)	36.80(32.03,51.84)	48.15(25.30,65.38)#	36.50(28.90,49.78)#	0.189

注:Pre 代表基线,Post 代表刺激后;#代表 sham 和 tDCS 刺激前后存在显著差异;*代表 sham 和 tDCS 刺激组间存在显著差异。

2.3 经颅直流电刺激对前后方向平衡控制的影响

组间分析发现(表 3),tDCS 和 sham 刺激在双足睁眼 MDX、MDTX、单足闭眼 MDX 存在显著差异;相比 sham 刺激,tDCS 刺激显著增加双足睁眼 MDX (t = −2.39,P = 0.017)和单足闭眼 MDX(z = −2.61,P = 0.031),显著增加双足睁眼 MDTX(z = −2.09,P = 0.036)。tDCS 和 sham 刺激未在双足闭眼和单足睁眼左右方向的平衡表现产生显著作用。相比基线,tDCS 刺激显著增加双足睁眼 MDX(z = −2.45,P = 0.014)、单足睁眼 MDX 位(z = −2.52,P = 0.012)和单足闭眼 MDX(z = −2.78,P = 0.006),显著增加双足闭眼 VX(z = −2.70,P = 0.007)。相比基线,sham 刺激未使双足睁眼、双足闭眼、单足睁眼和单足闭眼左右方向平衡表现呈现显著的改变。

表 3 经颅直流电刺激靶向性调控胫骨前肌对左右方向平衡表现的影响

Tab. 3 Effect of transcranial direct current stimulation on balance performance in the left-right direction

指标		tDCS		sham		组间分析
		Pre	Post	Pre	Post	P
双足睁眼	MDX	82.21(1.50,106.30)	94.81(82.62,110.08)	90.37(8.33,104.84)#	92.44(29.04,105.54)#	0.017*
	MDTX	11.91(7.95,17.11)	10.64(7.45,17.90)	10.52(7.17,18.46)	11.19(8.05,19.66)	0.036*
	VX	5.80(4.60,8.35)	5.05(4.78,5.93)	4.95(4.68,8.83)	4.90(4.68,8.40)	0.218
双足闭眼	MDX	92.24(4.60,106.16)	90.11(7.94,102.67)	94.03(27.17,104.47)	94.55(13.87,104.32)	0.833
	MDTX	9.74(8.35,18.42)	11.55(8.74,22.47)	10.66(7.07,16.67)	10.73(6.98,17.15)	0.592
	VX	5.55(5.18,9.80)	5.25(4.80,10.50)	5.40(5.08,8.79)#	5.20(4.90,8.52)#	0.498
单足睁眼	MDX	91.45(2.10,107.26)	98.79(81.26,106.43)	94.00(4.09,107.87)#	95.04(38.53,103.37)#	0.077
	MDTX	19.73(14.32,27.97)	16.32(12.28,23.86)	18.42(14.28,35.60)	19.09(13.34,31.12)	0.910
	VX	14.60(11.15,20.90)	11.60(9.65,15.86)	11.95(10.50,20.48)	11.85(9.50,17.45)	0.745
单足闭眼	MDX	90.10(0.72,103.81)	99.01(85.67,105.93)	92.81(−3.60,102.48)#	95.38(42.14,100.62)#	0.031*
	MDTX	37.55(24.07,59.95)	28.07(20.27,40.79)	48.53(23.41,55.99)	27.30(21.77,59.44)	0.200
	VX	28.60(19.08,50.28)	23.50(20.28,33.27)	31.15(19.08,43.20)	23.30(18.05,41.68)	0.404

注:Pre 代表基线,Post 代表刺激后;#代表 sham 和 tDCS 刺激前后存在显著差异;*代表 sham 和 tDCS 刺激组间存在显著差异。

chinaXiv:202303.00346v1

ChinaXiv合作期刊

2.4 经颅直流电刺激对神经生理学表现的影响

组间分析发现(表 4),RMT 未在 tDCS 刺激和 sham 刺激间呈现显著的差异。相比基线,尽管 RMT 在 sham 刺激后未呈现明显不同,但 RMT 在 tDCS 刺激后显著降低($z = -3.22, P = 0.001$)。组间分析发现,MEP 未在两种刺激间呈现显著的差异;相比基线,MEP 未在 tDCS 刺激和 sham 刺激后呈现明显不同。

表 4　经颅直流电刺激靶向性调控胫骨前肌对神经生理学表现的影响

Tab. 4　Effect of transcranial direct current stimulation on neurophysiology

指标	sham		tDCS		组间分析
	Pre	Post	Pre	Post	P
MEP	0.24(0.14,0.56)	0.36(0.16,0.70)	0.30(0.17,0.45)	0.25(0.20,0.52)	0.500
RMT	64(60,69)	64(54,70)	62(60,67)#	60(53,68)#	0.301

注:Pre 代表基线,Post 代表刺激后;#代表 sham 和 tDCS 刺激前后存在显著差异。

3 讨　论

胫骨前肌作为人体下肢平衡控制的主要核心肌群,采用 tDCS 对其进行靶向性调控是否可以诱导平衡能力的改善尚未有证据可循。本研究旨在探讨 tDCS 靶向性调控胫骨前肌对静态平衡的影响;研究发现,20 min,2 mA 的 tDCS 可以诱导大脑皮层兴奋性的提高,有效降低身体前后方向平衡指标的波动,但增加了身体左右方向平衡指标的波动。tDCS 靶向性调控胫骨前肌改善单足闭眼的平衡表现,但降低双足睁眼的平衡表现;tDCS 靶向性调控胫骨前肌的研究结果暂不完全支持本研究前期假设。

3.1 经颅直流电刺激对单腿站立静态平衡表现的影响

静态站立平衡主要通过身体重心活动的监测评估身体保持相对静止的能力[13],因此,身体重心不同方向的平均速度、平均中心变位和最大动摇径等成为评定静态平衡便捷、可行的指标[14]。tDCS 靶向调控胫骨前肌,单腿站立时,身体重心前后方向摆动和摆动速度均显著降低,身体重心左右方向和摆动显著增加,单足闭眼的平衡表现得到显著改善;表明 tDCS 靶向性调控胫骨前肌可有效引起单腿站立平衡的改善,但这种平衡表现的改善可能源自前后方向平衡稳定性的提高。研究结果支持 DUARTE 等[15]研究发现,即 tDCS 对平衡调控的有效性。

大脑皮层可通过神经冲动的传递调节躯干或下肢肌群活动、实现对躯体平衡的控制[16]。tDCS 可增加 M1 区大脑皮层兴奋性,提高大脑中枢向皮质脊髓通路的神经冲动的传递,增强大脑中枢对运动环节的控制和目标肌群的肌肉力量[17]。ROSTAMI 等[18]发现,20 min,2 mA 的 tDCS 调控 M1 皮层兴奋性,显著增强老年人对站立和行走时下肢功能性运动的控制。VARGAS 等[19]发现,20 min,2 mA 的 tDCS 调控 M1 皮层显著提高下肢股四头肌的力量表现。在本研究中,不仅将刺激靶区锁定 M1 区,还采用 TMS 对下肢胫骨前肌控制区皮层热点(在 M1 区 Cz 附近)进行靶向定位,实现了对下肢胫骨前肌的精准化刺激;由于胫骨前肌是控制身体平衡前后方向姿势稳定性的主要肌肉[9],tDCS 靶向性调控胫骨前肌后的平衡改善可能由于 tDCS 提高胫骨前肌在 M1 区热点的皮层兴奋性,增加胫骨前肌的肌肉力量和对下肢平衡的控制。但研究也发现,胫骨前肌作为人体平衡姿势控制的肌群,其兴奋性的提高会增加使身体左右方向晃动,降低左右方向稳定性[9]。由于人体身体左右方向平衡主要由腓肠肌、比目鱼肌等肌群的控制[20];然而,本研究并未对近端肌群进行靶向性调控。因此,身体左右方向稳定性的降低可能源于现有刺激方案对近端肌群的忽视,无法抵消单独胫骨前肌激活对左右方向稳定性的影响。

此外,本研究发现,tDCS 对胫骨前肌的靶向性调控未引起单足睁眼平衡表现的改善,表明视觉因素可能是一个影响刺激效果的因素。人体的平衡是视觉、前庭器官、本体感觉及神经中枢对信息整合的综合表现[20-21];相比其他器官,视觉感觉器官较灵敏且发达,视觉的有无对人体平衡控制具备非常大的影响[21]。王志朋[22]采用大脑皮层-肌肉相干性分析法对视觉、支撑面与人体静态平衡控制的影响探讨发现,视觉因素影响人体对平衡的控制,平衡运动会因视觉因素产生不同的运动表现。单足睁眼与闭眼平衡表现的差异提示,视觉因素会对 tDCS 刺激效果

chinaXiv:202303.00346v1

产生影响,需引起后续研究关注。

3.2 经颅直流电刺激对双腿站立静态平衡能力表现的影响

双足站立平衡从外观上被认为是一个简单的动作姿势,但作为人体生理机能的重要评估指标[21],其背后同样涉及非常复杂的科学问题[23]。相比单足闭眼站立平衡表现,tDCS 靶向性调控胫骨前肌显著降低双足睁眼前后方向重心摆动,显著增加双足睁眼和双足闭眼左右方向身体重心的摆动和摆动速度;然而,tDCS 对胫骨前肌的靶向性调控却显著降低双足睁眼站立平衡表现;表明单侧 tDCS 对胫骨前肌的靶向性调控无法诱导双足睁眼站立平衡的改善。研究结果暂不支持 DUARTE 等[15]和 DE MOURA 等[3]研究,tDCS 刺激可以显著改善双足睁眼平衡。与 DUARTE 等[15]研究对比分析发现,DUARTE 等主要刺激非控制侧大脑半球(non-dominant hemisphere)调控脑瘫儿童平衡能力,本研究主要刺激胫骨前肌控制侧的大脑半球(dominant hemisphere)调控健康人群平衡能力;因此提示,刺激方案的差异可能是导致不同刺激效果的重要因素。

人体大脑中枢对肢体行为控制采用交替支配的方式,单侧刺激主要对对侧(单侧)的肢体行为进行调控;当涉及双侧肢体活动时,需要同时对双侧控制脑区进行调控[5]。人体的双足站立平衡主要依靠双侧下肢协同工作共同完成;因此,为改善双足站立平衡表现,双侧 tDCS 靶向性刺激调控是一个理想的调控方案[24]。尽管早期的研究发现,单侧 tDCS 可增强大脑中枢对前后方向平衡的控制[25],但单侧 tDCS 刺激方案被证实存在一定的局限。相关研究发现,相比双侧 tDCS 刺激,单侧 tDCS 刺激存在累计效应低的不足[21];这表明单侧 tDCS 刺激方案的累计效果可能不足以引起双侧下肢环节平衡的改善,甚至还会因单侧肢体的激活诱导双侧肢体的不平衡,影响整体平衡表现。在本研究中,tDCS 对胫骨前肌靶向性调控主要采用单侧的刺激方案;因此,双足睁眼站立平衡表现下降有可能归因于单侧 tDCS 刺激方案的局限。此外, 本研究发现, 与单足站立平衡相似, 双足睁眼和双足闭眼在 tDCS 刺激后同样呈现不同的平衡表现; 这种调控结果差异再次凸显视觉因素对 tDCS 调控效果的影响, 需引起后续研究关注。

3.3 经颅直流电刺激靶向性调控胫骨前肌对神经生理学表现的影响

大脑中枢主要对人体平衡起到调控作用[16],对中枢神经系统的活动进行监控可了解运动与大脑皮层中枢的交互关系。TMS 作为一种成熟的非侵入性调控技术,不仅可用于临床治疗与诊断[26],也可有效监测运动对大脑中枢神经系统影响[27]。TMS 通过 RMT 和 MEP 等指标检测运动对大脑中枢神经系统及传导通路的影响。MEP 反映皮质脊髓束通路兴奋性,评价干预方案对大脑中枢可塑性的效果[27];RMT 反映中枢神经系统中单个神经元兴奋性,评价干预方案对大脑皮层兴奋性的效果[27]。tDCS 靶向性调控后仅引起 RMT 显著降低,未引起 MEP 显著改变,表明 tDCS 靶向性调控胫骨前肌引起大脑皮层兴奋性的增加,未对皮质脊髓束传导通路的兴奋性产生影响。研究结果支持 CRAIG 等[20]对青年人群平衡能力的研究,20 min,2 mA 的 tDCS 刺激无法引起青年人群 MEP 兴奋性的变化。针对 tDCS 靶向性调控胫骨前肌对神经生理学表现调控的非理想性,受试人群和刺激电极可能是影响 tDCS 调控效果主要因素。

人体站立平衡时,大脑中枢皮质之间、皮质与脊髓之间的功能性联系处于增强的状态,青年人本身又具备非常高的 MEP 阈值水平[28]。在本研究中,tDCS 对静态平衡表现的探讨主要围绕健康的在校大学生展开。因此,动作模式和受试者人群产生的天花板效应使神经生理学指标的改善处于较小的改善空间。但 tDCS 对健康人群靶向性调控所积累的神经生理学的结果,可为 tDCS 在特殊人群(如老年人、病患)中的应用奠定了良好的生理学证据。

3.4 研究的局限性与未来方向

tDCS 刺激电场与神经元的几何交互关系决定了大脑中枢神经元的兴奋方向和去极化的方向,但这种交互关系由刺激电极的决定[29],不同的刺激电极会影响 tDCS 对大脑功能和运动表现的调控效果[30-31]。在本研究中,因设备的限制,采用传统大电极作为刺激电极,尽管采用该电极对胫骨前肌的靶向性调控引起前后方向平衡表现的改善。但传统大电极被证实存在高弥散性、弱聚焦性等不足[32];因此,tDCS 的刺激效果可能会因上述不足的存在未达到最佳状态。其次,传统大电极较大的覆盖面积会

chinaXiv:202303.00346v1

ChinaXiv合作期刊

引起相邻脑区的共激活,同样影响 tDCS 调控效果[33]。尽管在 tDCS 刺激前,采用 TMS 对刺激电极摆放位置进行定位,最大限度保障 tDCS 刺激对大脑中枢的靶向作用;但因传统大电极存在对相邻脑区的调控效果,暂无法完全确定平衡表现的变化均源自 tDCS 对胫骨前肌的靶向性调控。近期的研究发现,使用较小阵列电极的新型神经调控技术——高精度经颅直流电刺激(high-definition tDCS, HD-tDCS)可以弥补传统大电极的不足[32]。POLLASTRI 等[32]基于传统 tDCS 大电极聚焦性弱的背景,采用 HD-tDCS 对耐力运动表现的调控效果进行研究发现,HD-tDCS 调控双侧背外侧前额叶,可以在不引起自行车运动员生理和心理表现表现的条件下,显著提高耐力运动表现。因此,为进一步优化或更准确评估 tDCS 靶向性调控胫骨前肌对静态平衡的调控效果,后续研究可采用 HD-tDCS 对 tDCS 进行替换。

4 结　论

tDCS 对胫骨前肌的靶向性调控有效提高大脑皮层兴奋性,改善单足站立闭眼站立平衡表现,但降低了双足睁眼站立平衡表现。tDCS 靶向性调控胫骨前肌所诱导单足平衡表现可能因为 tDCS 对胫骨前肌的激活提高了大脑中枢对身体前后方向平衡的控制;但 tDCS 刺激靶区对近端肌群忽视,无法避免胫骨前肌激活对身体左右方向的消极影响,也降低双腿静态站立平衡表现。为进一步优化 tDCS 对静态平衡的调控效果,后续研究可考虑从刺激靶区、脑区、受试者人群以及 HD-tDCS 技术的采用等方面进行更深层次的研究。

ChinaXiv:202203.00346v1

参考文献:

[1] XIAO S L, WANG B F, ZHANG X N, et al. Acute effects of high-definition transcranial direct current stimulation on foot muscle strength, passive ankle kinesthesia, and static balance: A pilot study [J]. Brain sciences, 2020, 10(4): 246.

[2] DE MOURA M C D S, HAZIME F A, MAROTTI APARICIO L V, et al. Effects of transcranial direct current stimulation (tDCS) on balance improvement: a systematic review and meta-analysis [J]. Somatosensory & motor research, 2019, 36(2): 122-135.

[3] BAHARLOUEI H, SABA M A, SHATERZADEH YAZDI M J, et al. The effect of transcranial direct current stimulation on balance in healthy young and older adults: a systematic review of the literature[J]. Neurophysiologie clinique, 2020, 50(2): 119-131.

[4] FOERSTER Á, MELO L, MELLO M, et al. Cerebellar transcranial direct current stimulation (ctDCS) impairs balance control in healthy individuals[J]. The cerebellum, 2017, 16(4): 872-875.

[5] 蒋文华. 神经解剖学[M]. 上海:复旦大学出版社,2004.

[6] SMITH M C, STINEAR J W, ALAN BARBER P, et al. Effects of non-target leg activation, TMS coil orientation, and limb dominance on lower limb motor cortex excitability[J]. Brain research, 2017, 1655: 10-16.

[7] NOWAK M, HINSON E, VAN EDE F, et al. Driving human motor cortical oscillations leads to behaviorally relevant changes in local $GABA_A$ inhibition: A tACS-TMS study[J]. The journal of neuroscience, 2017, 37(17): 4481-4492.

[8] GULLE H, DASKAPAN A, ARIK M. Muscle tibialis anterior fatigue protocol effects on kinetic and kinematic parameters of gait and balance: A laboratory study[J]. Physiotherapy, 2019, 105(S1): e49.

[9] DAY J T, LICHTWARK G A, CRESSWELL A G. Tibialis anterior muscle fascicle dynamics adequately represent postural sway during standing balance [J]. Journal of applied physiology, 2013, 115(12): 1742-1750.

[10] DI GIULIO I, MAGANARIS C N, BALTZOPOULOS V, et al. The proprioceptive and agonist roles of gastrocnemius, soleus and tibialis anterior muscles in maintaining human upright posture [J]. The journal of physiology, 2009, 587(10): 2399-2416.

[11] 杨延平,邱俊强,陈演,等. 个性化渐进式运动处方对老年女性平衡能力和下肢肌肉力量的影响[J]. 中国慢性病预防与控制,2020,28(10):785-788.
YANG Yanping, QIU Junqiang, CHEN Yan, et al. Effects of personalized progressive exercise prescription on balance and lower limb muscle strength in elderly women[J]. Chinese journal of prevention and control of chronic diseases, 2020, 28(10): 785-788 (in Chinese).

[12] DUTTA A, CHUGH S, BANERJEE A, et al. Point-of-care-testing of standing posture with Wii balance board and Microsoft Kinect during transcranial direct current stimulation: A feasibility study[J]. NeuroRehabilitation, 2014, 34(4): 789-798.

[13] JOHNSTON W, PURCELL C, DUFFY C, et al. Investigating normal day to day variations of postural control in a healthy young population using Wii balance boards[C]//2019 41st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2019: 2059-2062.

[14] BINESH M, MEHRABAN A H, KHALILI M A, et al. Relationship between functional balance tests and postural sway parameters in bending and picking up the object on the floor task in the chronic hemiparetic patients[J]. Koomesh, 2013, 14(4): 455-465.

[15] DUARTE N D A C, GRECCO L A C, GALLI M, et al. Effect of transcranial direct-current stimulation combined with treadmill training on balance and functional performance in children with cerebral palsy: A double-blind randomized controlled trial[J]. PloS one, 2014, 9(8): e105777.

[16] 郭峰,付彦铭,李东,等. 不同支撑模式下自由式滑雪空中技巧运动员大脑感觉运动皮质区对下肢肌肉控制模式的研究[J]. 体育科学,2021,41(1):65-74.

GUO Feng, FU Yanming, LI Dong, et al. A study on modes of sensorimotor cortex control of lower limb muscles under different support modes in national freestyle skiing aerial athletes[J]. China sport science, 2021, 41(1): 65-74(in Chinese).

[17] LATTARI E, OLIVEIRA B R R, MONTEIRO JÚNIOR R S, et al. Acute effects of single dose transcranial direct current stimulation on muscle strength: A systematic review and meta-analysis[J]. PloS one, 2018, 13(12): e0209513.

[18] ROSTAMI M, MOSALLANEZHAD Z, ANSARI S, et al. Multi-session anodal transcranial direct current stimulation enhances lower extremity functional performance in healthy older adults[J]. Experimental brain research, 2020, 238(9): 1925-1936.

[19] VARGAS V Z, BAPTISTA A F, PEREIRA G O C, et al. Modulation of isometric quadriceps strength in soccer players with transcranial direct current stimulation: A crossover study[J]. Journal of strength and conditioning research, 2018, 32(5): 1336-1341.

[20] CRAIG C E, DOUMAS M. Anodal transcranial direct current stimulation shows minimal, measure-specific effects on dynamic postural control in young and older adults: A double blind, sham-controlled study[J]. PloS one, 2017, 12(1): e0170331.

[21] 游永豪,温爱玲. 人体平衡能力测评方法[J]. 中国康复医学杂志,2014,29(11):1099-1104.

YOU Yonghao, WEN Ailing. Method of human balance ability assessment[J]. Chinese journal of rehabilitation medicine, 2014, 29(11): 1099-1104(in Chinese).

[22] 王志朋. 视觉和支撑面顺应性对人体静态站立平衡控制过程中脑电-肌电相干性的影响[J]. 中国运动医学杂志,2019,38(12):1032-1038.

WANG Zhipeng. Study on effects of vision and support surface compliance on cortical-muscular coherence during static standing balance[J]. Chinese journal of sports medicine, 2019, 38(12): 1032-1038(in Chinese).

[23] BORG F, FINELL M, HAKALA I, et al. Analyzing gastrocnemius EMG-activity and sway data from quiet and perturbed standing[J]. Journal of electromyography and kinesiology, 2007, 17(5): 622-634.

[24] RAMPERSAD S M, JANSSEN A M, LUCKA F, et al. Simulating transcranial direct current stimulation with a detailed anisotropic human head model[J]. IEEE transactions on neural systems and rehabilitation engineering, 2014, 22(3): 441-452.

[25] 闫红光,王艳玲. 国家优秀男子自由式滑雪空中技巧运动员躯干肌力特征及与静态平衡能力的关系探讨[J]. 沈阳体育学院学报,2009,28(5):55-58.

YAN Hongguang, WANG Yanling. Relationship between static balance ability and trunk muscle strength characteristics of national elite men's freestyle skiing aerials athletes[J]. Journal of Shenyang Sport University, 2009, 28(5): 55-58(in Chinese).

[26] 俞风云,朱玉连,王卫宁,等. 经颅磁刺激在脑卒中患者中的应用及机制研究进展[J]. 中国康复医学杂志,2021,36(8):1030-1034.

YU Fengyun, ZHU Yulian, WANG Weining, et al. Review on application and mechanism of transcranial magnetic stimulation in stroke patients[J]. Chinese journal of rehabilitation medicine, 2021, 36(8): 1030-1034(in Chinese).

[27] 张剑,庄洁,陈佩杰. 经颅磁刺激及其在运动科学中的应用展望[J]. 中国运动医学杂志,2009,28(3):353-356.

ZHANG Jian, ZHUANG Jie, CHEN Peijie. Prospective for transcranial magnetic stimulation and its application in sports science[J]. Chinese journal of sports medicine, 2009, 28(3): 353-356(in Chinese).

[28] HORVATH J C, FORTE J D, CARTER O. Evidence that transcranial direct current stimulation (tDCS) generates little-to-no reliable neurophysiologic effect beyond MEP amplitude modulation in healthy human subjects: A systematic review[J]. Neuropsychologia, 2015, 66: 213-236.

[29] NITSCHE M A, PAULUS W. Excitability changes induced in the human motor cortex by weak transcranial direct current stimulation[J]. The journal of physiology, 2000, 527(3): 633-639.

[30] 王开元,刘宇. 科技助力奥运——新科技与挑战[J]. 中国体育科技,2019,55(1):5-12.

WANG Kaiyuan, LIU Yu. The cutting-edge Olympics: new technologies and challenge[J]. China sport science and technology, 2019, 55(1): 5-12(in Chinese).

[31] 朱志强,王熙,张丹,等. 经颅电刺激对人体运动控制能力的影响研究进展[J]. 中国运动医学杂志,2020,39(10):825-829.

ZHU Zhiqiang, WANG Xi, ZHANG Dan, et al. Review on transcranial direct current stimulation on human motor control[J]. Chinese journal of sports medicine, 2020, 39(10): 825-829(in Chinese).

[32] POLLASTRI L, GALLO G, ZUCCA M, et al. Bilateral dorsolateral prefrontal cortex High-Definition transcranial Direct-Current stimulation improves Time-Trial performance in elite cyclists[J]. International journal of sports physiology and performance, 2021, 16(2): 224-231.

[33] HU X S, FISHER C A, MUNZ S M, et al. Feasibility of non-invasive brain modulation for management of pain related to chemoradiotherapy in patients with advanced head and neck cancer[J]. Frontiers in human neuroscience, 2016, 10: 466.

(编辑　黄崇亚　张璐)

chinaXiv:202303.00346v1